

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ КУРСОВА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»,
освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні
комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Електротехнологічні установки та системи: Курсова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, Є. О. Троценко, В. О. Шостак. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 50 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 05.11.2020 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 2 від 28.09.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ. КУРСОВА РОБОТА

Укладачі: *Бржезицький Володимир Олександрович*, д-р техн. наук, професор
Гаран Ярослав Олександрович, канд. техн. наук, асистент
Троценко Євгеній Олександрович, канд. техн. наук, доцент
Шостак Володимир Олександрович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор *Проценко О. Р.*, канд. техн. наук, доцент

Рецензент *Подольцев О. Д.*, д-р техн. наук, провідний науковий співробітник, Інститут електродинаміки НАН України

Викладені мета та завдання, теоретичні відомості та вказівки до виконання розділів курсової роботи. Розглянуті особливості електронно-променевої технології. Особлива увага приділяється енергетичному комплексу електронно-променевої установки для мікрозварювання. Наведена методика розрахунку режиму катоду та параметрів високовольтного джерела живлення.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	6
2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	7
2.1 ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	7
2.2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ УСТАНОВКИ.....	11
2.2.1 Структурна схема енергокомплексу	11
2.2.2 Вимоги до вихідних параметрів енергокомплексу.....	13
2.2.3 Електронно-променева гармата.....	17
2.2.4 Розрахунок струму емісії та режиму розжарення катоду	21
2.2.5. Приклад розрахунку катоду.....	27
2.3 СИСТЕМИ ФОКУСУВАННЯ І ВІДХИЛЕННЯ	29
2.4 ВИСОКОВОЛЬТНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ	32
2.5 РОЗДІЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ.....	37
2.5.1 Втрати напруги у кабелі.....	38
2.5.2 Напруга на виході випрямляча	42
2.5.3 Напруга вторинної обмотки трансформатора.....	42
2.5.4 Розрахунок магнітопроводу.....	42
2.5.5 Реактивний опір розсіювання трансформатора.....	43
2.5.6 Реактивний опір каскаду роздільних трансформаторів	43
2.5.7 Втрати напруги на реактивному опорі розсіювання каскаду	44
2.5.8 Приклад розрахунку.....	44
3 СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	45
4 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДВН – джерело високої напруги;

ЕГ – електронна гармата;

ЕПУ – електронно-променева установка.

ВСТУП

Застосування електронного променю як джерела нагріву з високою концентрацією енергії явилось основою для створення нових видів промислового устаткування та технологічних процесів, зокрема пов'язаних із мікрозварюванням.

Дія електронного променю як джерела нагріву ґрунтується на ефекті перетворення кінетичної енергії прискорених електронів в теплову при гальмуванні їх на поверхні матеріалів, що обробляються. В якості джерела прискорених електронів у електронно-променевої технології використовують електронні гармати. Фокусування електронного пучка до малих поперечних розмірів на поверхні виробу здійснюється електромагнітними лінзами. Електронна гармата і фокусувальна лінза створюють електронно-оптичну систему зварювальної установки. Коли гармати і лінзи об'єднані конструктивно в одному блоці, використовують звичайно один термін – *електронна гармата* (ЕГ).

Електронна гармата у сукупності з блоками її електроживлення та керування має назву *енергетичний комплекс*, який є основою електротехнологічного комплексу установки. Оскільки в таких установках використовують прискорення електронів до десятків кілоелектронвольт, окремі їх вузли необхідно розраховувати і виконувати із застосуванням *високовольтової ізоляції*. З урахуванням необхідності відтворення однакових режимів обробки для великої кількості виробів у промисловому виробництві до установки висуваються високі вимоги щодо стабільності підтримання її параметрів.

В курсовій роботі вивчається енергокомплекс типової електронно-променевої установки для мікрозварювання із спеціалізованим високовольтним джерелом живлення, виконуються розрахунки режимів

основних вузлів установки. Первинні матеріали для даної методичної розробки збиралися і готувалися за участю кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАНУ Лоскутова Геннадія Андрійовича.

1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Метою курсової роботи є детальне ознайомлення студентів із структурою енергетичного комплексу електронно-променевої технологічної установки, виконанням основних його складових частин, методикою розрахунку параметрів, схем та режимів роботи основних вузлів. Особливу вагу приділено, зокрема, тим вузлам, що працюють під високим потенціалом і потребують використання високовольтних джерел живлення.

Завдання курсової роботи:

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями, вказівками та прикладами до виконання розділів роботи.
2. Виконати розрахунок параметрів катоду, його струму емісії та режиму розжарювання згідно умов індивідуального варіанту.
3. Визначити первеанс електронно-променевої технологічної установки.
4. Виконати розрахунок ємнісного фільтру для високовольтного джерела живлення випрямленої високої напруги на чотирьох каскадах для електронно-променевої гармати на 50...70 кеВ.
5. Ознайомитися з порядком розрахунку кіл роздільних трансформаторів з високовольтною ізоляцією на 50...70 кВ. Виконати відповідні розрахунки.
6. Сформулювати підсумок за результатами виконання роботи.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ

2.1 ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

До основних відмінних особливостей електронно-променевої технології можна віднести: значну глибину зони, в якій виділяється енергія променю; гнучкість керування і висока точність регулювання потужності пучка; зберігання у вакуумі початкової чистоти матеріалів, що обробляються, та високі експлуатаційні властивості одержуваних виробів.

Нагрівання електронним променем в різних варіантах технології здійснюється завдяки ефекту перетворення кінетичної енергії прискорених електронів в теплову при гальмуванні їх в поверхневому шарі матеріалів, що обробляються. В розрахунках електронно-променевих процесів одним із основних параметрів є потужність пучка

$$Q = iU, \quad (1)$$

де: i – струм пучка;

U – прискорювальна напруга.

При променевому зварюванні (як різновиді електронно-променевої технології, що розглядається далі) переважна частина цієї потужності витрачається на нагрівання і розплавлення металу у зоні зварювання (ванні).

Глибина проплавлення і форма зварювального шва обумовлюється поверхневою густиною виділення енергії з потужністю

$$p = \frac{Q}{S_n} = \frac{4iU}{\pi d^2}, \quad (2)$$

де $S_n = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа перерізу пучка-плями на поверхні деталі; d – діаметр плями.

Чим більша густина потужності, тим більше локальне розігрівання досягається у місці гальмування пучка. Можливість отримання високої енергії, що виділяється, і її концентрації дозволяє отримати «кинджальний» шов з великим відношенням глибини (h) до ширини проплавлення (b), тобто $h / b = 20 : 1$ і більше, що є перевагою електронно-променевого зварювання. Залежність глибини проплавлення від значення струму пучка та прискорювальної напруги є нелінійною, при зміні цих параметрів змінюється і діаметр пучка [1]. Згідно теоретичних досліджень приймають [1]:

$$d = \left(\frac{i}{S_1 U} \right)^{\frac{3}{8}}; \quad (3)$$

$$p = S_0 i^{\frac{1}{4}} U^{\frac{7}{4}}. \quad (4)$$

Коефіцієнти S_0 і S_1 враховують вплив факторів, які обмежують можливості досягнення мінімального діаметру плями при фокусуванні електронного пучка на поверхні виробу. До них відносяться: розкид початкових теплових швидкостей електронів, ефект просторового заряду, хроматична і сферична аберації фокусувальних електромагнітних лінз.

Із (3) і (4) та графіків на рисунку 1, випливає, що теоретично п'ятикратне збільшення струму пучка при постійній прискорювальній напрузі приводить до підвищення густини потужності в 1,5 рази, а діаметр плями збільшується при цьому в 1,8 рази. Таке ж підвищення прискорювальної напруги при незмінному струмі пучка приводить до підвищення густини потужності в 17 разів, при цьому діаметр плями зменшується в 1,8 рази. Таким чином, виходячи з розглянутих даних, для

досягнення більш високих значень густини потужності доцільно збільшувати напругу, а не струм. Однак, з підвищенням напруги зварювальна установка в цілому дорожчає, потребує створення додаткового захисту від рентгенівського випромінювання, ускладнюється її обслуговування. У зв'язку з цим економічно обґрунтованим граничним значенням високої напруги для електронно-променевого зварювання вважається напруга приблизно 200 кВ.

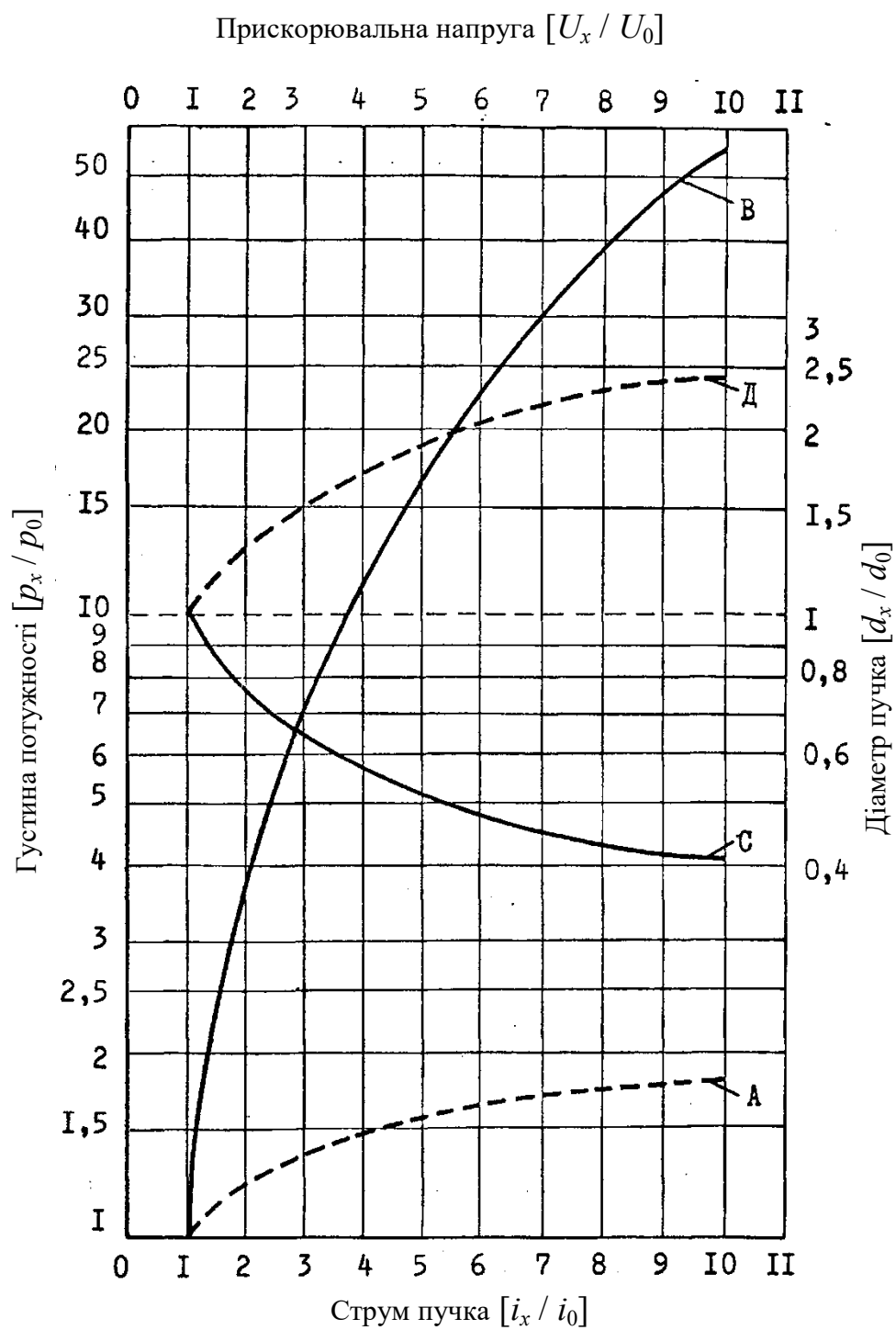


Рисунок 1 - Густина потужності p та діаметр пучка d при відносних змінах струму та напруги: А - $p = f(i)$ при $U = \text{const}$; В - $p = f(U)$ при $i = \text{const}$; С - $d = f(U)$ при $i = \text{const}$; Д - $d = f(i)$ при $U = \text{const}$.

За значенням прискорювальної напруги сучасні електронно-променеві установки (ЕПУ) поділяють на: умовно "низьковольтні" ($U = 10 \dots 30$ кВ); з проміжною напругою ($U = 50 \dots 60$ кВ); високовольтні ($U = 100 \dots 200$ кВ).

Щодо застосування в технологічних процесах розрізняють установки для [2]:

мікрозварювання, з потужністю від 1 до 5 кВт;

однопрохідного зварювання металів середніх товщин, з потужністю від 5 до 30 кВт;

зварювання металів великих товщин до 100...200 мм, з потужністю пучка від 30 до 120 кВт.

2.2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ УСТАНОВКИ

2.2.1 Структурна схема енергокомплексу

На рисунку 2 представлена структурна схема енергокомплексу типової електронно-променевої зварювальної установки. В залежності від призначення і потужності установки, типу електронної гармати, катода і схеми керування параметрами пучка, в систему електроживлення може входити частина блоків з різним ступенем вимог до їх вихідних параметрів. Як згадувалося, в курсовій роботі розглядається енергокомплекс типової електронно-променевої установки для мікрозварювання із спеціалізованим високовольтним джерелом живлення.

У склад електронно-оптичної системи установки входять такі основні вузли :

- тріодна електронна гармата;

- юстирувальні котушки;
- фокусувальна лінза;
- система відхилення;
- колектор вторинних і відбитих електронів.

У склад джерела живлення електронно-променевої установки (ЕПУ) входять блоки:

- регулювання та стабілізації розжарення катоду;
- керування та стабілізації струму пучка ;
- джерело високої напруги (ДВН);
- живлення фокусувальної лінзи, юстирувальних котушок та системи відхилення.

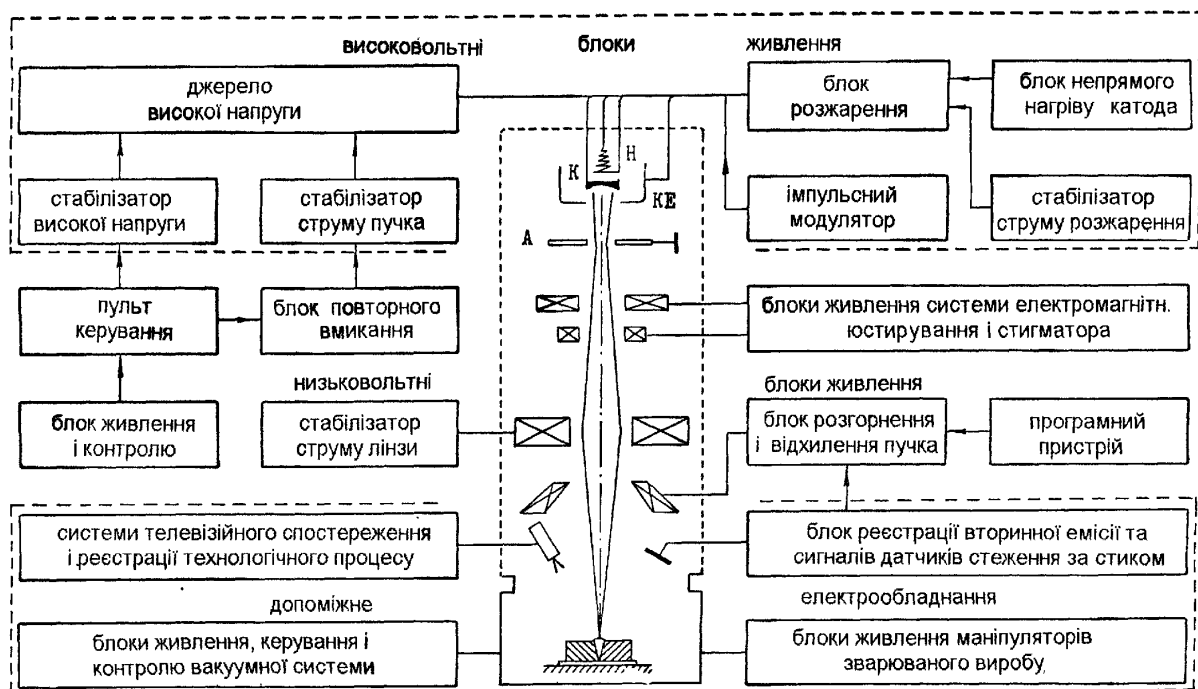


Рисунок 2 - Структурна схема енергокомплексу типової електронно-променевої зварювальної установки

2.2.2 Вимоги до вихідних параметрів енергокомплексу

Потужність енергокомплексу визначається діапазоном технологічних задач, для вирішення яких призначена ЕПУ. Зокрема, в установці для мікрозварювання при прискорювальній напрузі 60 кВ і струмі пучка до 15 мА максимальна потужність $P = iU = 900$ Вт достатня для зварювання виробів з титану, нержавіючої сталі та алюмінієвих сплавів товщиною до 5 мм. Для фокусування пучка на виробі, який знаходиться на відстані 100...150 мм від торця лінзи, через обмотку фокусувальної лінзи необхідно пропустити постійний струм $I_{\phi} = 0,5... 1,0$ А.

Наведені параметри прийнято вважати основними електричними характеристиками зварювальної установки, від яких залежать параметри технологічного процесу. При розробці і експлуатації ЕПУ важливою та складною в технічному виконанні є задача підтримки постійними цих характеристик у часі, тобто стабілізація основних параметрів із заданою точністю протягом технологічного процесу.

З виразів (2)...(4) витікає, що для підтримки постійними густини потужності та глибини проплавлення перш за все необхідно забезпечити стабільність прискорювальної напруги і струму пучка. Зварювання електронним променем характеризується малим часом встановлення стану рівноваги зварювальної ванни. При збільшенні робочої напруги гармати струм пучка змінюється за законом

$$i \sim U^{\frac{3}{2}},$$

тому навіть короточасні зміни прискорювальної напруги можуть викликати зміни потужності пучка та параметрів зварювального шва. Фокусна відстань лінзи при постійному струмі підмагнічування також залежить від прискорювальної напруги, тому її нестабільність призводить

до зміни діаметру пучка і густини потужності на поверхні виробу. Аналогічні зміни відбуваються внаслідок коливань струму магнітної лінзи при постійній прискорювальній напрузі.

В багатьох випадках для суміщення променю зі стиком зварюваних виробів або при зварюванні по заданому контуру використовуються магнітні відхиляючі системи. Кут відхилення пучка цими системами залежить від величини прискорювальної напруги, тому її стабілізація необхідна також для виключення зміщення променю зі стику в процесі зварювання.

Таким чином, для забезпечення стабільності густини потужності в процесі обробки необхідна стабілізація трьох основних параметрів: струму пучка, прискорювальної напруги і струму фокусувальної лінзи. На рис. 3, 4 наведено експериментальні дані щодо зміни глибини проплавлення при зміні цих параметрів, що дозволяє обґрунтувати вимоги до стабільності вихідних характеристик джерела живлення зварювальної установки.

Зміна прискорювальної напруги у межах 3...4 % призводить до помітної зміни глибини проплавлення ($h/h_0 = 0,8$) та зміщення пучка відносно початкового положення при постійному струмі відхиляючої системи, тому допустима нестабільність високої напруги, особливо при зварюванні металів малих товщин, повинна бути у межах 1 ... 2 %.

Зміна струму пучка на декілька відсотків від оптимального значення мало впливає на глибину проплавлення, і нестабільність його порядку 2% в більшості випадків відповідає технологічним вимогам.

Більш жорсткі вимоги висуваються до стабільності струму I_ϕ фокусувальної лінзи, тому що при цьому виникає не тільки зміна діаметру фокальної плями на виробі, але й зміщення її по висоті відносно поверхні виробу, тому нестабільність струму лінзи не повинна перевищувати 0,05 %.

Стабілізовані за величиною струм пучка, прискорювальна напруга і струм лінзи у певній мірі не можна вважати постійними, тому що вони пульсують відносно середніх значень з частотами гармонік вибраних схем випрямлення. Тому в джерелах живлення необхідно виконати заходи для зниження коефіцієнтів пульсацій цих параметрів.

Для забезпечення розглянутих вимог у склад енергокомплексу запроваджуються стабілізатори як основних, що розглядалися, так і допоміжних параметрів. У зв'язку з цим до джерела живлення ЕПУ звичайно входять:

- стабілізатор струму розжарення катоду;
- стабілізатор високої напруги ;
- стабілізатор струму пучка ;
- стабілізатор струму фокусувальної лінзи ;
- стабілізатор напруги 220 В, 400 Гц генератора живлення.

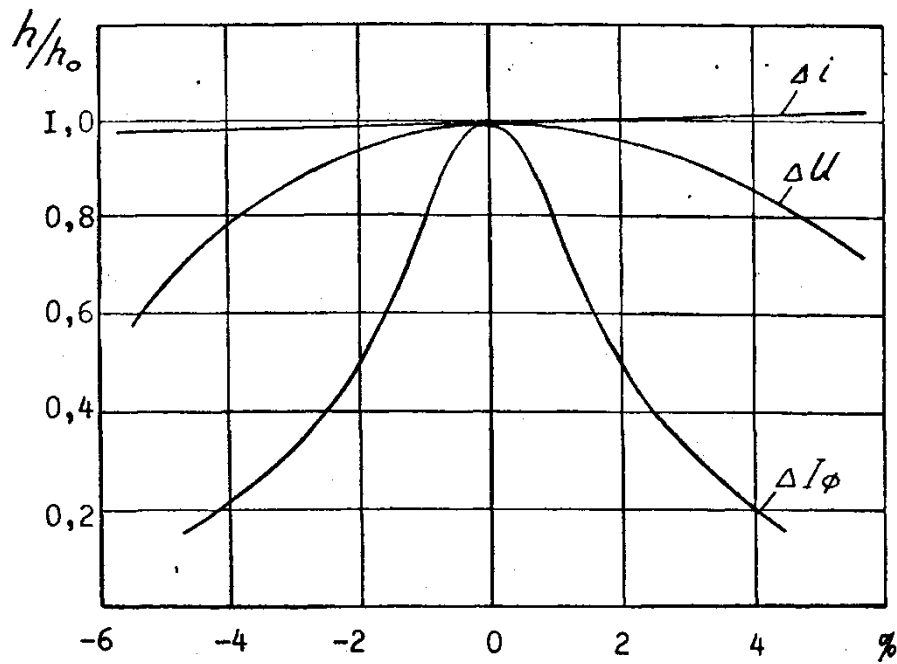


Рисунок 3 - Відносна зміна глибини проплавлення h/h_0 при зміні струму пучка Δi , прискорювальної напруги ΔU і струму лінзи ΔI_ϕ

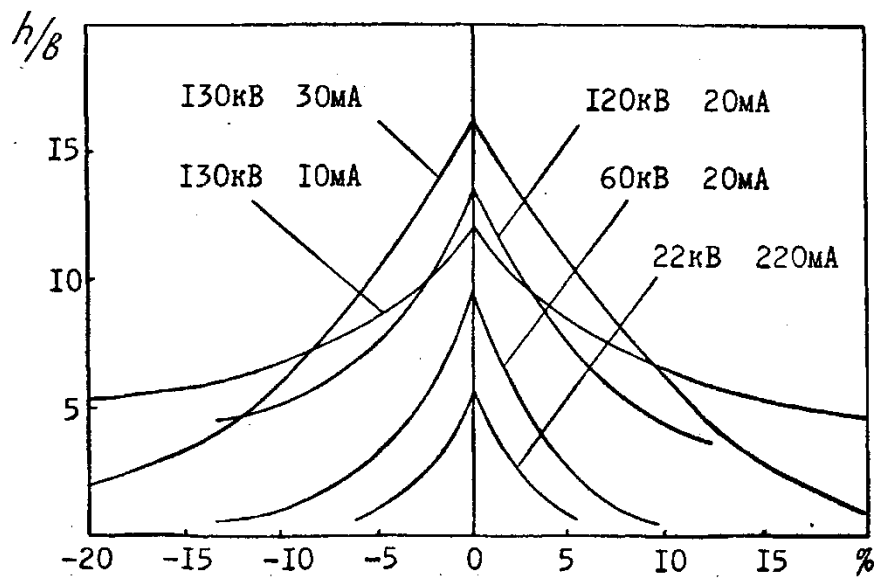


Рисунок 4 - Відношення глибини проплавлення h до ширини b при відхиленні струму фокусування ΔI_ϕ від оптимального значення

2.2.3 Електронно-променева гармата

Електронно-променева гармата – складний і досконалий електронний прилад, який служить для створення високоенергетичного пучка електронів малого діаметру. Важливо, щоб пучок зберігав гранично високу потужність на значній відстані від гармати, тобто мав малий кут розбіжності.

Незважаючи на зовнішню різноманітність конструктивного виконання, в основу більшості ЕПУ покладена принципова схема електронної оптики, яку показано на рис. 5а. Найбільше застосування знайшли тріодні системи. Катоди в них найчастіше використовуються двох типів: V - подібний (шпилькоподібний) із вольфрамового дроту або стрічковий з танталу.

У тріодних гарматах повна величина прискорювальної напруги прикладена до одного вакуумного проміжку катод - анод, а для керування струмом пучка до керуючого електрода підводиться від'ємний потенціал відносно катода (може сягати - 1000 В).

Між керуючим електродом і анодом створюється майже рівномірно розподілене прискорювальне поле. Винятком є зони центральних отворів, де еквіпотенціальні лінії (поверхні) електричного поля мають вигнуту форму. Такий розподіл поля має властивості фокусувальної лінзи. У випадку розподілу потенціалів, показаному на рис. 5б, прискорювальне поле проникає в зону катода, відбираючи електрони з його поверхні і поступово прискорюючи їх до енергії 60 кеВ. Рух електронів відбувається по нормалям до еквіпотенціальних поверхонь. Тому для електронів, які входять в поле з бокової частини катода і які мають малу початкову енергію, лінза має збиральні властивості. Внаслідок цього більшість емітованих електронів фокусуються поблизу анода.

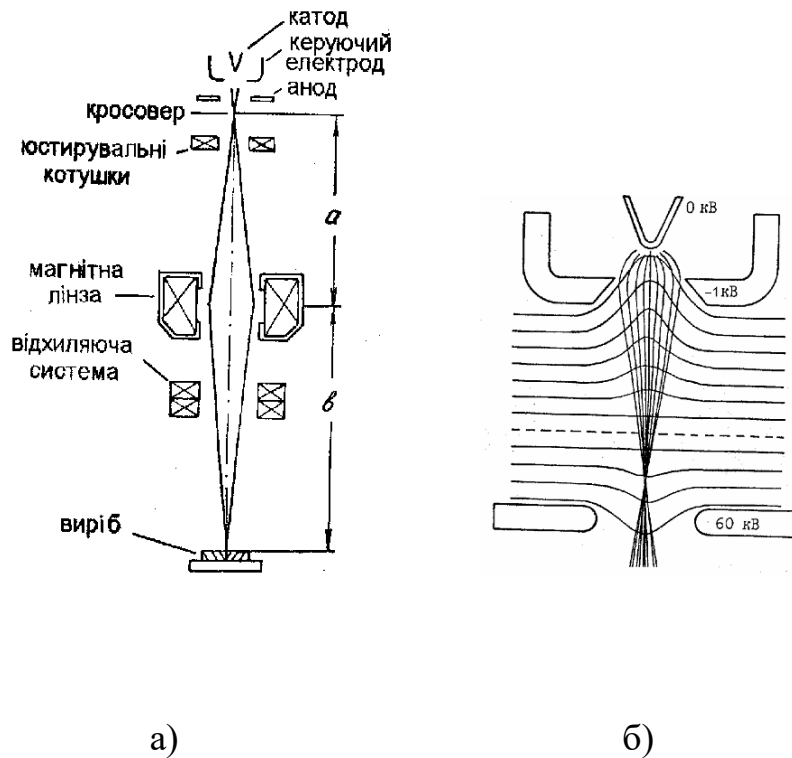


Рисунок 5 - Схема електронної оптики зварювальної установки (а) та розподіл електричного поля і траєкторій електронів у тріодній гарматі (б) відносно потенціалу катоду (умовно – «0» кВ)

В електронній оптиці така система електродів називається імерсійним об'єктивом [3], а найбільше звуження пучка в зоні фокусування – кросовером. В подальших розрахунках оптичної системи установки кросовер вважається уявним зображенням катоду.

Змінюючи величину від'ємного потенціалу на керуючому електроді гармати, можна керувати розподілом поля поблизу катоду і тим самим регулювати величину поверхні катоду, з якої відбувається відбирання

електронів прискорювальним полем. Тим самим створюється можливість керувати струмом пучка.

Поле в зоні анода має розсіювальні властивості, але впливом його на траєкторії електронів можна нехтувати, тому що поблизу анода електрони мають максимальну швидкість і слабо відхиляються в полі розсіювальної лінзи.

Розрахунок швидкості v електронів виконується виходячи із рівності кінетичної і потенціальної енергії електронів:

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \text{ звідки} \quad (5)$$

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

де e , m - заряд і маса електрона.

При $U = 60 \cdot 10^3$ В отримуємо $v = 145250$ км/с, що складає біля половини швидкості світла. Внаслідок цього при точних розрахунках необхідно враховувати релятивістську поправку.

Розрахунок траєкторій електронів, положення і діаметру кросовера є складним із-за невизначеності початкових швидкостей та напрямків виходу електронів з катода і розподілу прискорювального поля поблизу катода. При цьому точність розрахунку залежить від ступеню врахування цих факторів.

У зв'язку з цим на практиці частіше всього обмежуються розрахунком електричної міцності ізоляції електродів, а потім для визначення електронно-оптичних характеристик пучка використовують моделювання і експериментальні дослідження вибраного типу гармати.

Електрична міцність вакуумного середовища, наприклад, у проміжку сфера (діаметр 24,5 мм) – площа при міжелектродних відстанях 10...20

мм характеризується максимальною напруженістю порядку 100 кВ/мм [4]. У реальних конструкціях гармат ця величина значно менше, тому що катодний вузол у рідких випадках має сферичну форму, а для виходу електронів в керуючому електроді і аноді є отвори, які порушують розподілення електричного поля, сприяють відхиленню траєкторій руху електронів та знижують граничну величину пробивної напруженості.

Зниження електричної міцності вакуумного проміжку також відбувається внаслідок іонізації молекул залишкових газів електронним пучком, бомбардування анода електронами, а катода – іонами парів зварюваного металу, а також внаслідок деяких інших причин, які сприяють іонізації залишкових газів і виникненню пробою. Тому на практиці при розрахунках гармат приймають електричну міцність вакуумного середовища $E_{\text{ВАК}} = 10$ кВ/мм, а по поверхні ізоляційних матеріалів (кераміка, скло і т. д.) – $E_{\text{ІЗ}} = 1$ кВ/мм [5].

Присутність великої кількості електронів в зоні катод-анод може призвести до викривлення розподілу поля між електродами і зміни траєкторій електронів внаслідок впливу просторового заряду [6].

Одним із основних параметрів, який враховує геометрію електродів ЕГ, а також вплив просторового заряду на величину струму променя, є так званий "первеанс" гармати, який розраховують за формулою:

$$P = \frac{i}{U^{\frac{3}{2}}}. \quad (7)$$

В пучках електронів, первеанс яких менший за $1 \cdot 10^{-7}$ А/В^{3/2}, впливом просторового заряду можна знехтувати [6] (неінтенсивні пучки). Це положення повністю стосується установки, яка розглядається в курсовій роботі, тому що при струмі пучка $i = 15$ мА первеанс гармати становить

$$P = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{(60 \cdot 10^3)^{\frac{3}{2}}} \approx 1 \cdot 10^{-9}, \text{ A/B}^{\frac{3}{2}},$$

що на два порядки менше величини, зазначеної вище.

2.2.4 Розрахунок струму емісії та режиму розжарення катода

Емісійна здатність катодів визначається роботою виходу

$$W_{\text{вих}} = e\phi, \quad (8)$$

де ϕ - різниця потенціалів (потенціальний бар'єр) на границі метал - вакуум. Значення величини ϕ , у вольтах, для деяких металів наведено у табл. 1 [6] (див. також [8]).

Таблиця 1 – До визначення роботи виходу металів

Метал	Вольфрам W	Молібден Mo	Тантал Ta	Платина Pt	Барій Ba	Цезій Cs	Мідь Cu	Залізо Fe	Нікель Ni
ϕ , В	4,58	4,16	4,10	5,32	2,52	1,87	5,0	4,77	5,03

Густина струму емісії при нагріванні катода, тобто при термоелектронній емісії, розраховується за формулою Річардсона-Дешмана [7]

$$j_{so} = AT^2 \exp\left(-\frac{b}{T}\right), \quad (9)$$

де j_{so} - густина струму, А/см²; $A = 120,4 \frac{\text{A}}{\text{см}^2 \cdot \text{K}^2}$; T – температура катода, К; $b = 11600\phi$, К.

При виборі матеріалу катоду важливим фактором є не тільки висока густина емісії, але й збереження її протягом тривалого часу без руйнування матеріалу катода. Тобто необхідно, щоб катод мав високу механічну міцність і малу швидкість M' випаровування матеріалу при високих температурах нагріву (див. останній стовпчик в таблиці 2).

За конструкцією і умовами роботи електронно-променевої гармати ЕПУ представляє собою розбірний високовольтний триод, який працює при порівняно низькому вакуумі порядку 10^{-2} Па, що сприяє інтенсивному руйнуванню поверхні катода іонним бомбардуванням. Крім того, під час експлуатації катод піддається багаторазовій дії атмосферного повітря та парів зварюваного металу.

Внаслідок цього в ЕПУ є неприпустимим використання високоемісійних та ефективних катодів, оскільки вони легко окислюються, в той час як такі катоди, зазвичай, нормально використовуються в електронних лампах при вакуумі $10^{-6} \dots 10^{-5}$ Па.

Таблиця 2 - Характеристики вольфрамового катоду в залежності від температури (умовні позначення за стор. 25)

T, K	$P', Вт$	$R' \times 10^6, Ом$	I', A	$U' \times 10^3, В$	I_s', A	$M', г/с$
2300	148,2	85,22	1319	112,4	0,128	$2,45 \cdot 10^{-10}$
2400	181,2	89,65	1422	127,5	0,364	$1,37 \cdot 10^{-9}$
2500	219,3	94,13	1526	143,6	0,935	$6,36 \cdot 10^{-9}$
2600	263,0	98,66	1632	161,1	2,25	$2,76 \cdot 10^{-8}$
2700	312,7	103,22	1741	179,7	5,12	$9,95 \cdot 10^{-8}$
2800	368,9	107,85	1849	199,5	11,11	$3,51 \cdot 10^{-7}$
2900	432,4	112,51	1961	220,6	22,95	$1,08 \cdot 10^{-6}$

3000	503,5	117,21	2072	243,0	44,40	$3,04 \cdot 10^{-6}$
------	-------	--------	------	-------	-------	----------------------

У зв'язку з цим у більшості ЕГ використовуються металеві термокатоди з вольфраму і танталу, а в потужних гарматах – таблеткові катоди з гексабориду лантану LaB_6 . За способом нагрівання використовуються катоди з прямим та непрямим розжарюванням.

Вольфрам має високу температуру плавлення $T = 3683 \pm 20$ К і в той же час забезпечує високу питому емісію електронів при температурі на 1000 К нижче точки плавлення; він має при цьому достатню механічну міцність та відносно малу швидкість випаровування.

Розрахунок катодів прямого розжарювання робиться на основі теорії ідеального катоду, за який приймається прямолінійний однорідний катод, що має рівномірну емісію з бокової поверхні [7]. У реальному катоді утримувачі створюють охолоджені кінці у місцях кріплення катода, однак середня частина його практично не відрізняється від моделі ідеального катоду.

До розрахункових параметрів відносяться: струм емісії I_s ; напруга U_p , струм I_p та потужність P_p розжарення; ефективність H ; довговічність t і опір R катода. Ідеальний катод довжиною L з площею перерізу S_k і периметром l_{π} має наступні характеристики:

площа поверхні емісії

$$S_e = l_{\pi} L, \quad (10)$$

опір катоду

$$R = \rho \frac{L}{S_k}, \quad (11)$$

де ρ - питомий опір матеріалу катода в Ом·см, якщо L в см та S_k в см².

При напрузі розжарення U_p через катод протікає струм розжарення I_p , нагріваючи його до високої температури, при цьому більша частина потужності $P_p = I_p U_p$, яка підводиться, витрачається на випромінювання. При питомому випромінюванні тепла σ , потужність випромінювання з бокової поверхні катода дорівнює

$$P_p = \sigma l_{\pi} L. \quad (12)$$

Потужність, яка витрачається катодом на емісію електронів, дорівнює $P_e = \phi \cdot I_s \ll P_p$, тому при розрахунках нею можна нехтувати. Тоді рівняння теплової рівноваги, коли температура катода незмінна у часі, можна записати у вигляді:

$$P_p = \sigma l_{\pi} L = I_p^2 R = I_p^2 \rho \frac{L}{S_k} = \frac{U_p^2}{R} = \frac{U_p^2 S_k}{\rho L}. \quad (13)$$

З цих відношень отримують вирази для струму і напруги розжарення:

$$I_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \sqrt{S_k l_{\pi}}, \text{ А}, \quad (14)$$

$$U_p = \sqrt{\sigma \rho} \sqrt{\frac{l_{\pi}}{S_k}} L, \text{ В}. \quad (15)$$

При питомій емісії, розрахованій по формулі (9), струм емісії з бокової поверхні ідеального катода дорівнює

$$I_s = j_{so} l_{\pi} L, \text{ А}. \quad (16)$$

Для катодів кругового перерізу при розрахунках використовується поняття *одиночного катода*. Це катод, довжина і діаметр якого

дорівнюють 1 см, тобто $L = D = 1$ см. У цьому випадку $l_n = \pi \cdot D = \pi$ та $S_k = \pi \cdot D^2/4 = \pi/4$, тоді формули (11) - (16) для одиничного катоду дають:

$$R' = \frac{4}{\pi} \rho; P' = \pi \sigma; I' = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}; U' = 2\sqrt{\rho \sigma}; I'_s = \pi j_{so}. \quad (17)$$

Розрахункові значення цих параметрів при різних температурах нагрівання одиничного вольфрамового катоду наведено у згаданій вже таблиці 2 [7].

Використовуючи знайдені із (17) значення R' , P' , I' , U' та I'_s і повертаючись до формул (11) – (16), знаходимо розрахункові формули для катода кругового перерізу діаметром D і довжиною L_k (тут L_k та D у см), який показано на рис. 6а:

$$R = R' \frac{L_k}{D^2}, \text{ Ом}, \quad (18)$$

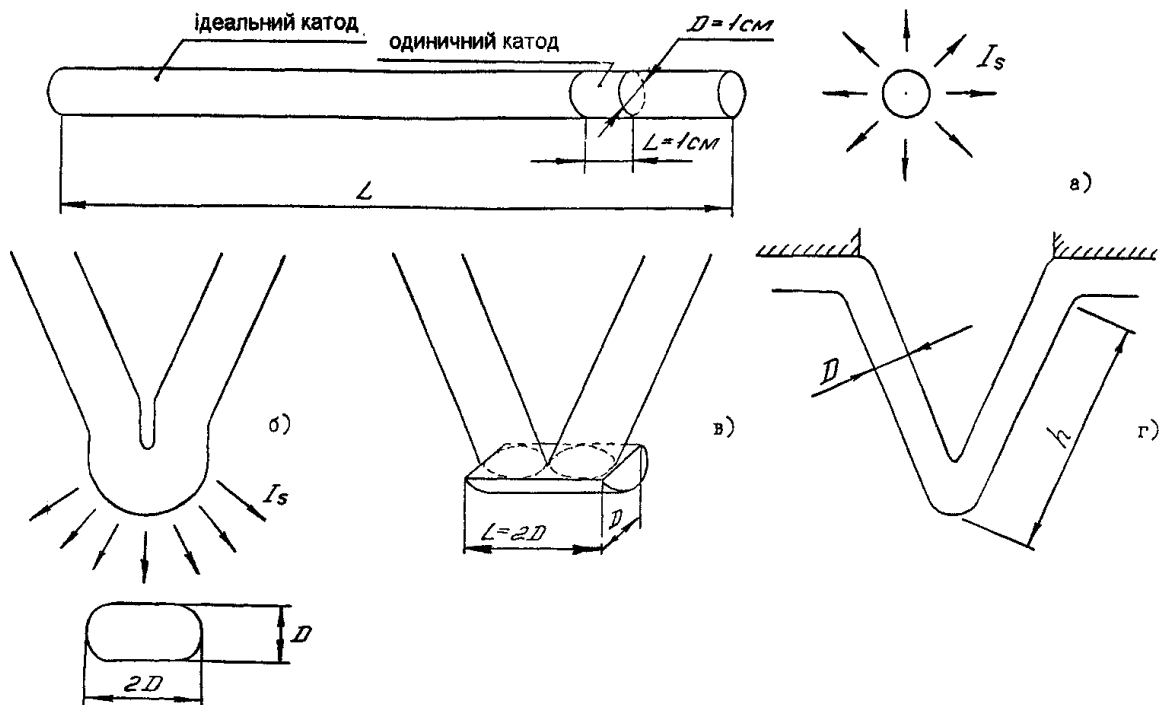


Рисунок 6 - До розрахунку струму емісії катода

$$P_p = P' DL_\kappa, \text{ Вт}, \quad (19)$$

$$I_p = I' D^{\frac{3}{2}}, \text{ А}, \quad (20)$$

$$U_p = U' \frac{L_\kappa}{D^{\frac{1}{2}}}, \text{ В}, \quad (21)$$

$$I_s = I'_s DL_\kappa, \text{ А}. \quad (22)$$

В ЕГ при використанні V-подібного катода відбирання електронів відбувається тільки з торця катода, тобто з поверхні, близької за площею до поверхні еліпсоїда, мала вісь якого дорівнює діаметру D дроту, а велика вісь дорівнює $2D$ (рис. 6б). З достатньою для розрахунків точністю можна прийняти, що площа емісії з поверхні еліпсоїда дорівнює половині бокової поверхні циліндричного катода з розмірами, які вказані на рис. 6в. Тоді формула (22) для розрахунку струму емісії у даному випадку буде мати вигляд:

$$I_s = I'_s \frac{1}{2} D \cdot 2D = I'_s D^2, \text{ А}. \quad (23)$$

звідки знаходимо D .

Ефективність катода H – допоміжний параметр, який розраховується за формулою

$$H = \frac{I_s}{P_p} \quad (24)$$

і характеризує струм емісії на одиницю потужності розжарення (цей параметр залежить від діаметру дроту та способу кріплення катода).

Важливим параметром для ЕГ є довговічність t катода, тому що для його заміни необхідно переривати технологічний процес, виконувати напускання повітря, а також робити розбирання та збирання катодного вузла, що пов'язане зі значними втратами робочого часу та інших ресурсів.

Вважається, що довговічність – це строк служби катода, протягом якого його діаметр зменшується на 10 % із-за випаровування матеріалу при високій температурі [7]. Як вже згадувалося, швидкість випаровування M' для ідеального одиничного вольфрамового катода при різних температурах наведено в табл. 2.

При зменшенні діаметру катода збільшується його опір, що веде до зміни режиму розжарювання і, у кінцевому рахунку, до зміни струму емісії. Для підтримки струму емісії незмінним використовують стабілізацію температури катода або одного з параметрів розжарення: струму або напруги.

В залежності від вибраної схеми стабілізації розраховують довговічність катода за формулами:

$$t = 8,5 \cdot 10^{-4} \frac{D}{M'}, \text{ год } (T = \text{const}), \quad (25)$$

$$t = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{D}{M'}, \text{ год } (I_p = \text{const}), \quad (26)$$

$$t = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{D}{M'}, \text{ год } (U_p = \text{const}). \quad (27)$$

2.2.5. Приклад розрахунку катода

Вихідні дані:

Струм електронного пучка i (струм емісії I_s), мА.....10

Режим роботи катода.....стабілізація струму розжарення

Довжина катода ($L_k = 2h$, рис. 6г), см.....1

Визначити: $D, I_p, U_p, P_p, R, H, t$.

Виберемо робочу температуру катода $T = 2800$ К.

Із табл. 2 знаходимо :

$$I'_s = 11,11 \text{ А} \qquad I' = 1849 \text{ А} \qquad U' = 199,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$P' = 368,9 \text{ Вт} \qquad R' = 107,85 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \qquad M' = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ г/с.}$$

Підставляючи у формули (18...21, 23, 24, 26) вихідні і табличні дані, отримаємо розрахункові параметри катода:

$$D = \sqrt{\frac{I_s}{I'_s}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{11,11}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ (см)} = 0,3 \text{ (мм)},$$

$$I_p = 1849 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^{\frac{3}{2}} = 1849 \cdot 5,2 \cdot 10^{-3} = 9,6 \text{ (А)},$$

$$U_p = \frac{199,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{\sqrt{3 \cdot 10^{-2}}} = 1,15 \text{ (В)},$$

$$P_p = 368,9 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 11 \text{ (Вт)},$$

$$R = 107,85 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{(3 \cdot 10^{-2})^2} = 0,12 \text{ (Ом)},$$

$$H = \frac{11,11 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2}{11} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ (А/Вт)} = 0,9 \text{ (мА/Вт)},$$

$$t = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-2}}{3,51 \cdot 10^{-7}} = 20 \text{ (год)}.$$

2.3 СИСТЕМИ ФОКУСУВАННЯ І ВІДХИЛЕННЯ

Із-за різниці початкових умов виходу окремих електронів з катоду, як за швидкостями, так і за напрямками, фокусування їх на виході з гармати відбувається не в одній точці, а у деякій зоні, яка характеризується діаметром кросовера $d_{кр}$ (рис. 7а). В малопотужних гарматах діаметр кросовера складає 200...300 мкм і служить початковим параметром для розрахунків системи фокусування.

Для фокусування пучка на виробі у переважній більшості ЕПУ використовують короткі електромагнітні лінзи з аксіально-симетричним розподіленням магнітного поля (рис. 7а). Коротка магнітна лінза створює таке аксіально-симетричне поле, зона взаємодії якого з електронним пучком поширюється на відстань, значно меншу, ніж фокусна відстань лінзи [3].

Конструктивно лінза являє собою багатовиткову котушку, розміщену в корпусі із магнітом'якого заліза АРМКО (рис. 7б). У зазорі лінзи створюється постійне магнітне поле з необхідним розподілом як по осі лінзи, так і в радіальному напрямку, при взаємодії з яким крайові електрони пучка зміщуються до осі та фокусуються на поверхні виробу вже за межами дії поля. Необхідна для створення певного магнітного поля кількість ампер-витків лінзи розраховується за формулою [2]

$$I_{\phi} W_{л} = k \sqrt{\frac{U}{f}}, \quad (28)$$

де I_{ϕ} – струм у витках котушки; f - фокусна відстань лінзи; k - коефіцієнт пропорційності; U – прискорювальна напруга; $W_{л}$ - кількість витків котушки лінзи.

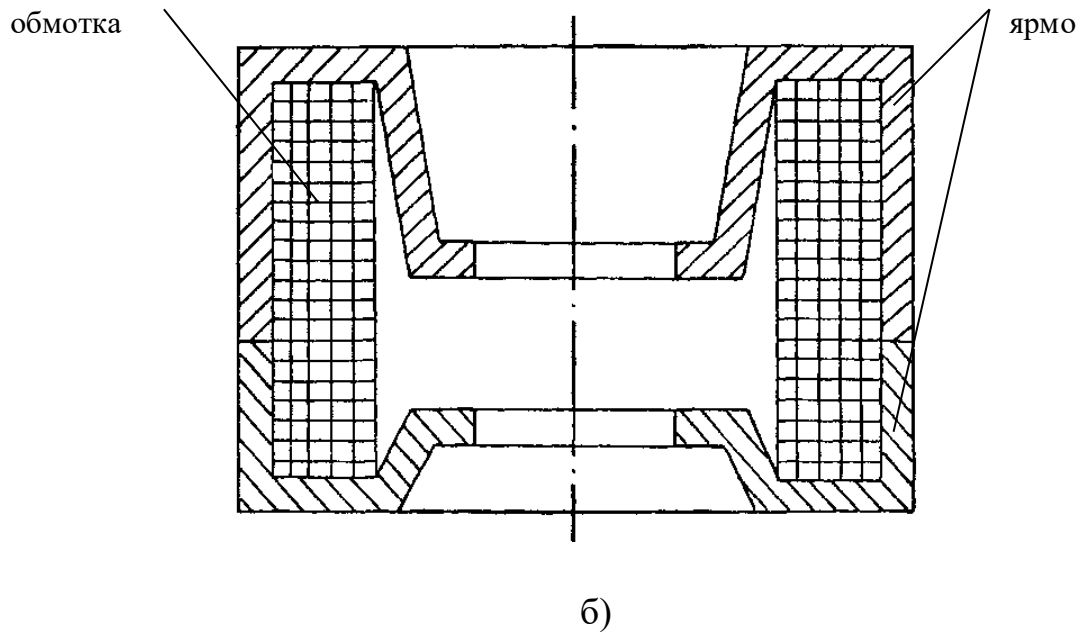
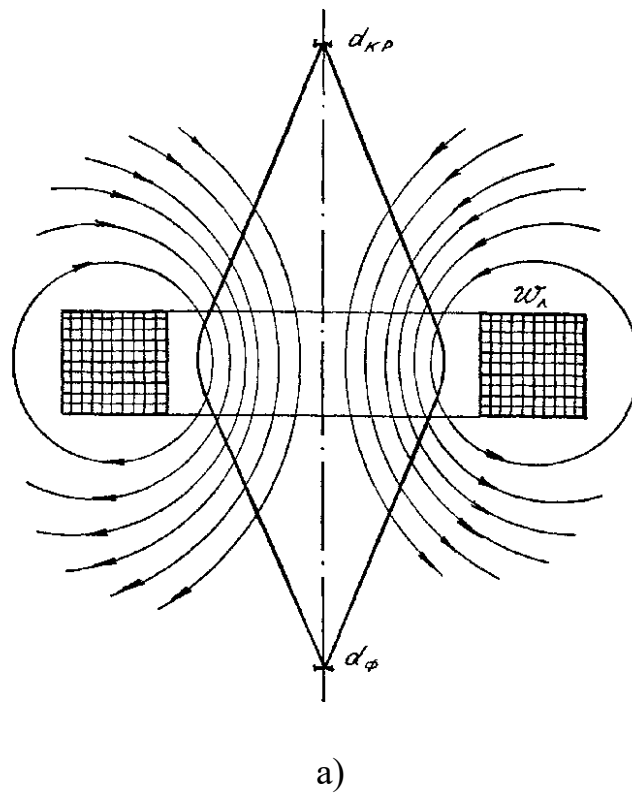


Рисунок 7 - Розподілення поля (а) і конструктивне виконання (б)
електромагнітної фокусувальної лінзи

Для розрахунку діаметра пучка на виробі d_ϕ використовують формули світлової оптики [2] (див. рис. 5а, 7а):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}; \quad \frac{d_\phi}{d_{\text{кр}}} = \frac{b}{a}. \quad (29)$$

Для електромагнітних лінз характерні усі види аберацій скляної оптики, тому для нормального формування пучка в електронно-оптичній системі необхідне юстирування по одній осі елементів, які входять до неї. За відсутності можливості механічного юстирування одинарні або двоярусні юстирувальні котушки розміщуються між гарматою та фокусувальною лінзою. Вони здійснюють нахил або паралельне перенесення пучка відносно осі оптичної системи по двом координатам. Живлення до котушок підводиться від стабілізованого джерела постійного струму з роздільним регулюванням струму котушок.

Для переміщення пучка по поверхні виробу використовуються електромагнітні системи відхилення різних типів: без магнітопроводів, з магнітопроводами, торіодальні, статорні, комбіновані. Вони дозволяють відхиляти пучок у двох взаємоперпендикулярних напрямках по закону кругової, циклоїдальної або особливого виду розгортки, наприклад, растрової.

У поєднанні з датчиками зворотного зв'язку (колектори вторинних електронів та іонів, датчики положення стику тощо) система відхилення є необхідним інструментом для пошуку стику зварюваних деталей та стеження за ним, для переміщення пучка по заданому контуру та інших технологічних завдань.

2.4 ВИСОКОВОЛЬТНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ

Електроустаткування ЕПУ (див. рис. 2) являє собою комплекс різних джерел живлення та контрольно-вимірювальної апаратури, які забезпечують отримання необхідних енергетичних та електронно-оптичних характеристик ЕГ, керування ними в процесі технологічної обробки і роботу допоміжних пристроїв установки. Сукупність вихідних характеристик енергетичного комплексу визначає експлуатаційно-технологічні можливості ЕПУ, а їх стабільність – точність відтворення режимів обробки та якість виробів.

Розглянемо особливості основного електроустаткування енергокомплексу ЕПУ для мікрозварювання, функціональну схему якого подано на рис. 8.

Основою більшості джерел високих напруг (ДВН) є трифазний підвищуючий трансформатор з випрямлячем високої напруги. При використанні декількох послідовно поєднаних трансформаторно-випрямних блоків утворюється каскадне джерело високої напруги.

При проектуванні джерел живлення ЕПУ значна увага приділяється питанням забезпечення електричної міцності. Для розміщення ізоляції обмоток вікна магнітопроводів ДВН мають збільшені розміри, тому в трансформаторах ЕПУ дещо більше розсіяння магнітного потоку і підвищені активні втрати у сталі порівняно з силовими трансформаторами тієї ж потужності. Габарити і масу трансформаторів можна значно зменшити, підвищуючи частоту мережі живлення, тому у ДВН ЕПУ використовуються електромеханічні або напівпровідникові перетворювачі з частотою 400 Гц і більше.

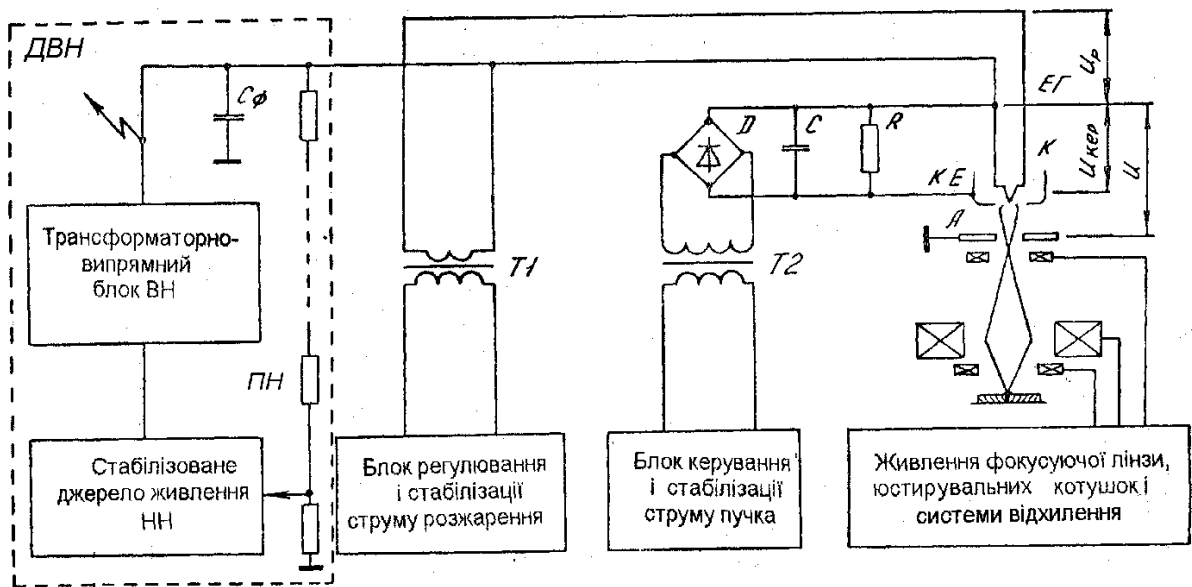


Рисунок 8 - Функціональна схема джерела живлення ЕПУ для мікрозварювання

За типом ізоляції ДВН, що розглядається, відноситься до так званих "сухих" джерел відкритого типу з повітряною ізоляцією. Для забезпечення міжвиткової ізоляції та ізоляції обмоток від магнітопроводу часто використовується епоксидний компаунд [9]. Електрична міцність нового компаунда складає 20 кВ/мм. Проте, внаслідок нерівномірності поля, часткових розрядів і старіння компаунда, його електрична міцність при тривалій експлуатації знижується до значення $E = 6...6,5$ кВ/мм, яке й використовується у практичних розрахунках ізоляції.

Каскадний принцип будовання джерела високої напруги дозволяє забезпечити його електричну міцність при порівняно невеликій витраті ізоляційних матеріалів. Джерело складається з двох підвищуючих трансформаторів і чотирьох випрямних каскадів, виходи яких поєднані послідовно (див. рис. 9). Напруга до первинних обмоток трансформатора T_2 підводиться через обмотки зв'язку w_{3B} . При такій схемі виконання робочі напруги між елементами обмоток і магнітопроводом складають U_0

= 15 кВ (якщо повна напруга становить 60 кВ). З урахуванням перенапруг, які з'являються в ДВН, і необхідного запасу випробувальних напруг, товщина ізоляції обмоток практично визначається із співвідношення

$$\Delta_{\text{в}} \approx \frac{3U_0}{E} = \frac{45}{6,5} \approx 7 \text{ (мм)}. \quad (30)$$

Конструктивне виконання та розміщення обмоток однієї фази на стрижні магнітопроводу T_I показане на рис. 10.

Вибір схеми випрямлення визначається вимогою малого рівня пульсацій високої напруги. Характер впливу пульсацій на процес зварювання аналогічний впливу нестабільності прискорювальної напруги і може призвести до утворення зубчатого профілю проплавлення у корені шва відповідно частоті пульсацій. Тому при розробці джерела необхідно вжити заходи щодо зниження пульсацій напруги до рівня, який не перевищує допустиму нестабільність високої напруги, тобто до 1 %.

Перш за все необхідно знизити коефіцієнт пульсацій за рахунок схеми випрямлення. З цією метою використовують 6-імпульсну схему Ларіонова з коефіцієнтом пульсацій вихідної напруги $k_{\text{п}} = 5,7 \%$. При частоті 400 Гц, частота пульсацій $f_{\text{п}} = 400 \cdot 6 = 2400$ Гц.

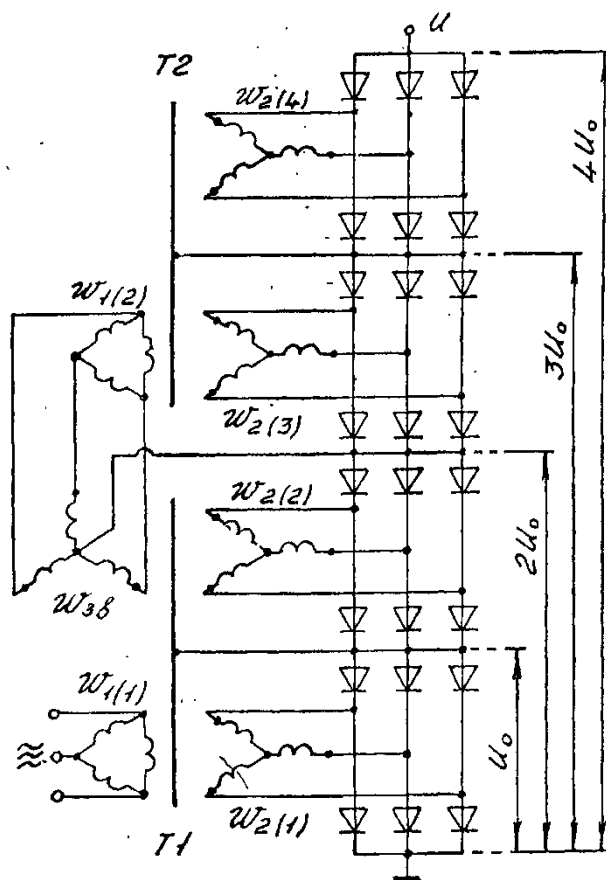


Рисунок 9 - Каскадный трансформаторно-выпрямный блок ДВН

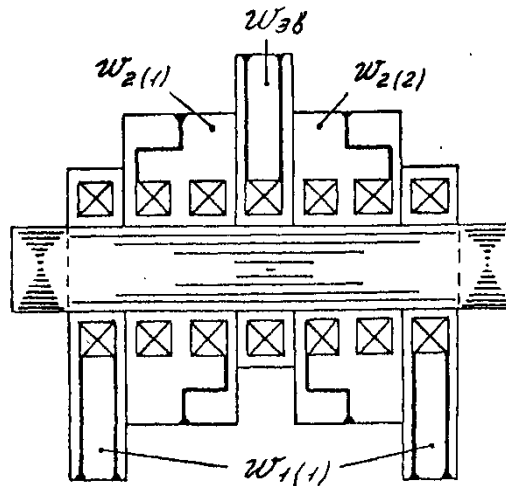


Рисунок 10 - Розміщення обмоток на стрижні трансформатора T_1

У схемі на рис. 9 первинні обмотки T_1 , T_2 поєднані "трикутником", а обмотки зв'язку T_1 - по схемі "зірка". При ідентичному виконанні і з'єднанні вторинних обмоток T_1 , T_2 , у каскадному джерелі таким чином досягається зсув лінійних напруг вторинних обмоток на 30° , що еквівалентне 12-фазній схемі випрямлення. При цьому частота пульсацій підвищується вдвічі до 4800 Гц, а коефіцієнт пульсацій знижується теоретично до $k_n = 1,4 \%$. Практично він складає 5...6 % із-за несиметрії фаз мережі, магнітопроводів, розкиду параметрів обмоток. Домінуючою частотою пульсацій при цьому є частота мережі $f_m = 400$ Гц.

Для зниження коефіцієнту пульсацій використовується ємнісний фільтр, який утворюється ефективним опором навантаження R_n і вихідним конденсатором. Ємність фільтру вибирається за умовою [10]

$$x_{\text{сф}} \leq 0,1R_n.$$

$$R_n = R = \frac{U}{I} = \frac{60 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-3}} = 60 \cdot 10^6 (\text{Ом}), \quad (31)$$

$$x_{\text{сф}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{м}} C_{\text{ф}}} = 0,6 \cdot 10^6 \text{ (Ом)},$$

$$C_{\text{ф}} \geq \frac{1}{2\pi f_{\text{м}} x_{\text{сф}}} = \frac{1}{6,28 \cdot 400 \cdot 0,6 \cdot 10^6} = 0,66 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

2.5 РОЗДІЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Катод та практично керуючий електрод гармати знаходяться під високим потенціалом від'ємної полярності -60 кВ, тому для передавання напруг розжарення і керування у джерелі живлення ЕПУ використовуються роздільні трансформатори (наприклад, T_1 та T_2 на рис. 8). Роздільними високопотенціальними трансформаторами називаються трансформатори, у яких потенціал однієї із обмоток (або двох обмоток) відносно магнітопроводу перевищує 1000 В. Потужність таких трансформаторів звичайно невелика (у межах десятків ВА).

Варіант приєднання схеми включення трансформаторів для забезпечення розжарення катоду показано на рис. 11. Розжарювальна обмотка w_2 трансформатора знаходиться під потенціалом -60 кВ, а по іншим елементам T_3, T_4 рівномірний розподіл потенціалів задається примусово за допомогою високоомного подільника напруги $R_1 \dots R_4$. За умови рівності опорів $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, напруга між кожною обмоткою і магнітопроводом складає 15 кВ. Для зменшення потоків розсіювання використовують переважно броньові осердя (рис. 12, 13а).

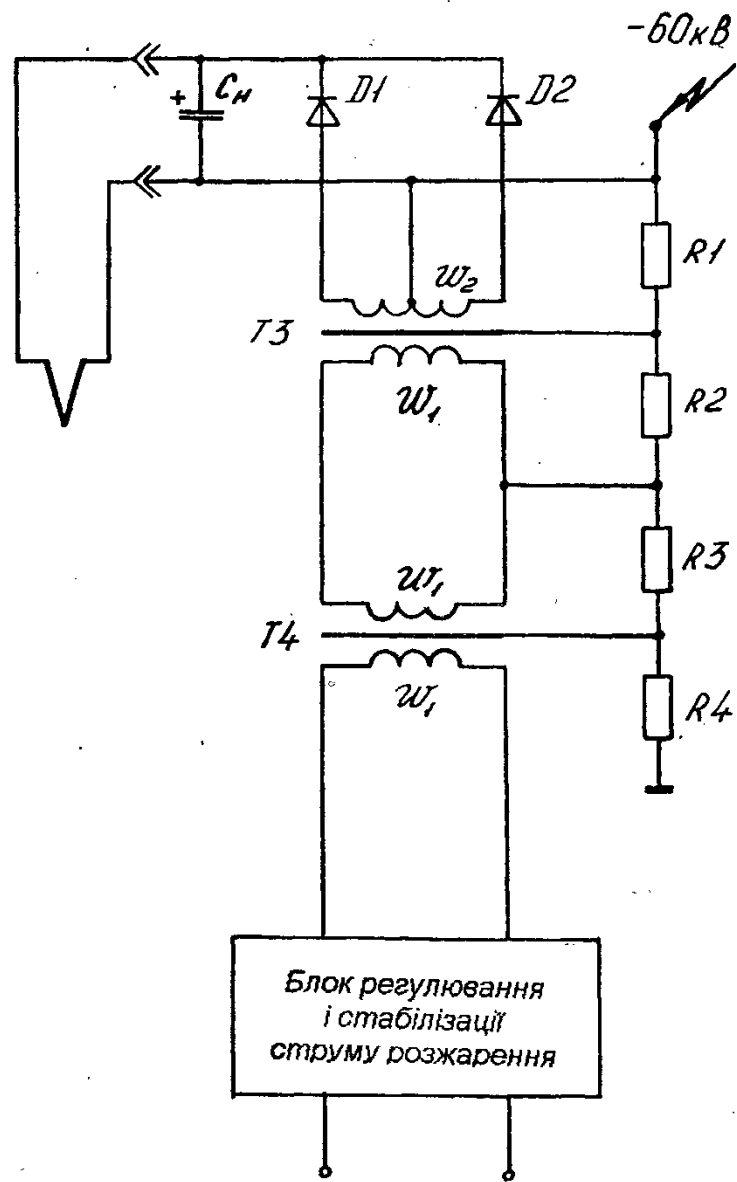
Розглянемо порядок розрахунку кіл роздільних трансформаторів T_3, T_4 при заданому струмі I_p і опорі R розжарення катоду.

2.5.1 Втрати напруги у кабелі

Втрати напруги у кабелі, по якому струм розжарення підводиться до катоду гармати, залежать від довжини $l_{\text{каб}}$, і його погонного опору r_0 . Для кабелю, наприклад, типу 4 КВЕЛ [2] $r_0 = 0,03$ Ом/м (для двох дротів), тоді

$$R_{\text{каб}} = r_0 l_{\text{каб}}, \text{ Ом}, \quad (32)$$

$$U_{\text{каб}} = I_p r_0 l_{\text{каб}}, \text{ В}. \quad (33)$$



~ 220 В 400 Гц

Рисунок 11 – Роздільний трансформатор

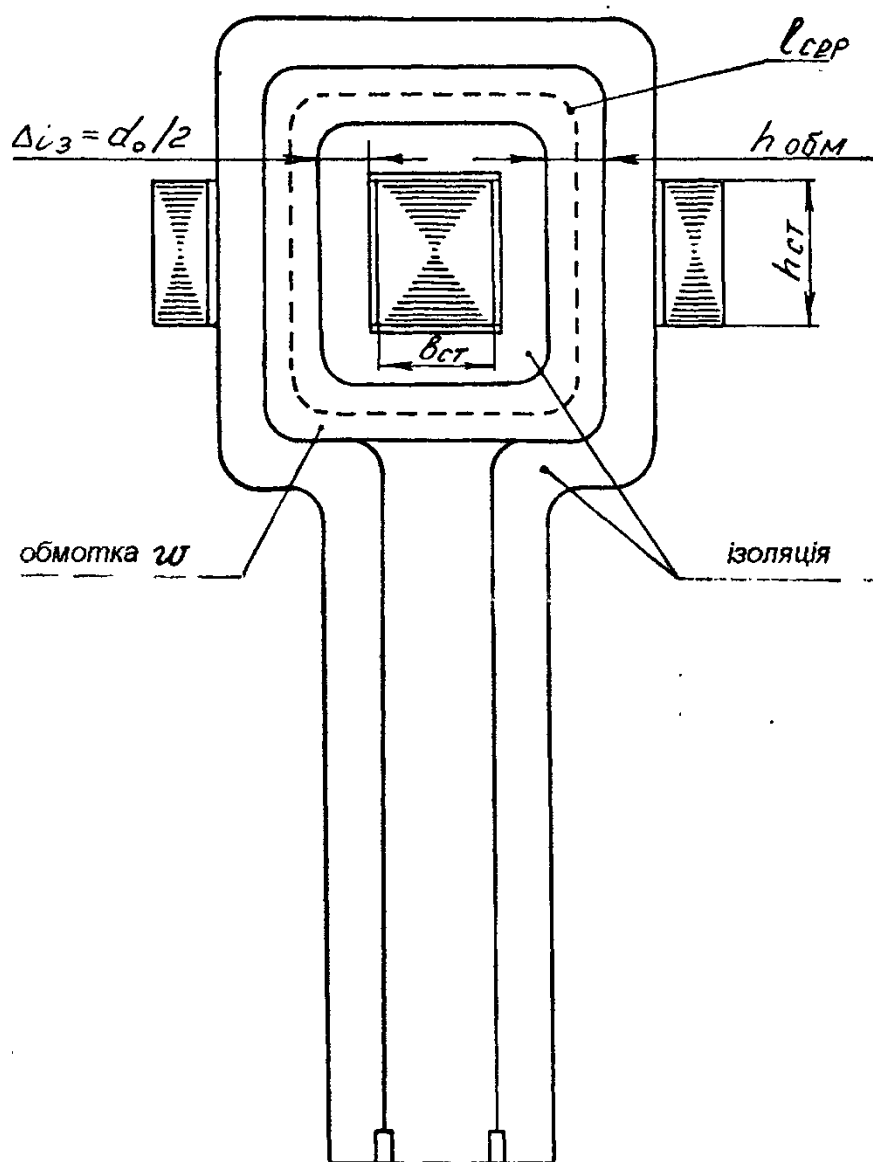


Рисунок 12 - До розрахунку магнітопроводу

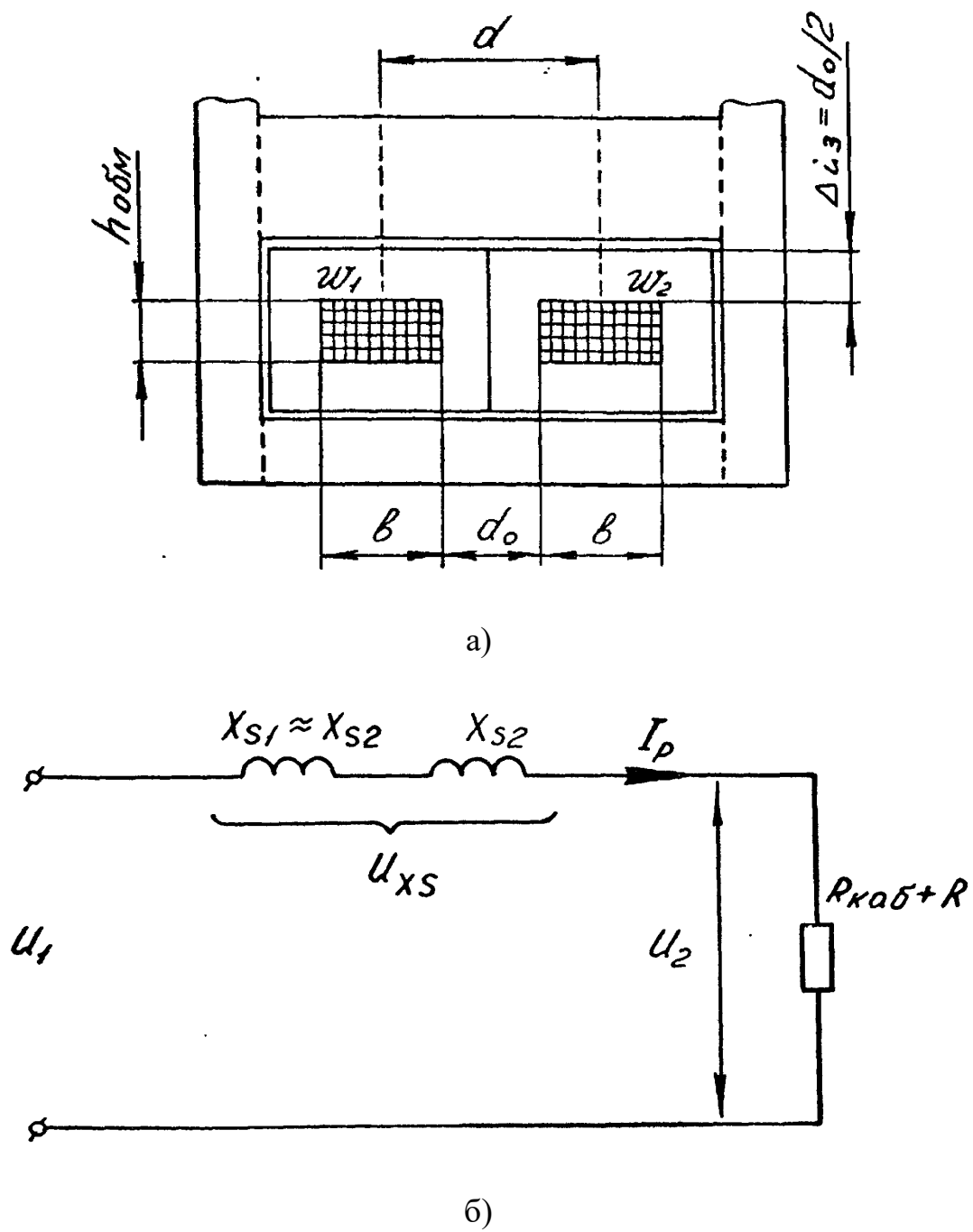


Рисунок 13 - Конструктивне виконання каскаду трансформаторів (а) та еквівалентна схема каскаду (б)

2.5.2 Напруга на виході випрямляча

Напруга на виході випрямляча повинна дорівнювати

$$U_{\text{в}} = U_{\text{р}} + U_{\text{каб}} = I_{\text{р}}(R + R_{\text{каб}}). \quad (34)$$

2.5.3 Напруга вторинної обмотки трансформатора

З урахуванням втрат у вентилях [10], напруга вторинної обмотки трансформатора при роботі на активно-ємнісне навантаження дорівнює

$$U_2 = 0,93U_{\text{в}}. \quad (35)$$

2.5.4 Розрахунок магнітопроводу

Візьмемо кількість витків на вольт 1 вит/В. Тоді розрахункову кількість витків половини вторинної обмотки w_2 (див. рисунок 11) вважаємо кількісно рівною значенню напруги U_2 . З урахуванням необхідності регулювання напруги розжарення вважаємо $w_2 = 1,3U_2$ (з округленням до найближчого цілого числа).

Виходячи із формули напруги трансформатора [11], запишемо

$$1,3U_2 = 4,44f_{\text{м}}BS_{\text{ст}}w_210^{-6}, \text{ В}, \quad (36)$$

де B - максимальне значення індукції, яке вибирається, Тл; $f_{\text{м}}$ - робоча частота, Гц; $S_{\text{ст}}$ - переріз магнітопроводу із сталі, мм².

Звідси знаходимо переріз сталі

$$S_{\text{ст}} = \frac{1,3U_210^6}{4,44f_{\text{м}}Bw_2} = \frac{10^6}{4,44f_{\text{м}}B}, \text{ мм}^2, \quad (37)$$

де $f_{\text{м}} = 400$ Гц.

Згідно з рисунка 12,

$$S_{\text{ст}} = b_{\text{ст}} h_{\text{ст}} k_{\text{ст}}, \quad (38)$$

де $b_{\text{ст}}$ - ширина середнього стрижня Ш-подібного заліза; $h_{\text{ст}}$ - висота набору магнітопровода; $k_{\text{ст}}$ - коефіцієнт заповнення сталі.

Вибираючи $b_{\text{ст}}$, знаходимо

$$h_{\text{ст}} = S_{\text{ст}} / b_{\text{ст}} k_{\text{ст}}.$$

2.5.5 Реактивний опір розсіяння трансформатора

Реактивний опір розсіяння трансформатора, приведений до вторинної обмотки w_2 , розраховується за формулою [11]

$$x_{s2} = 8\pi f_m l_{\text{сер}} w_2^2 \left[\ln \frac{d}{b + h_{\text{обм}}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)^2 \ln(1 + \beta) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 \ln(1 - \beta) \right] 10^{-10}, \text{ Ом}, \quad (39)$$

де $d = d_0 + b$ - приведений канал розсіяння (b , d_0 , d визначаються за рис. 13а); $\beta = b / d$; $l_{\text{сер}}$ - середня довжина витка, $h_{\text{обм}}$ - висота обмотки ($l_{\text{сер}}$ та $h_{\text{обм}}$ визначаються за рис. 12).

При визначенні геометричних розмірів обмотки w_2 слід враховувати, що відповідно до схеми рис. 11 її намотка, фактично, повинна мати подвоєну кількість розрахункових витків.

2.5.6 Реактивний опір каскаду роздільних трансформаторів

Враховуючи, що трансформатори T_3 , T_4 мають однакове конструктивне виконання, вважаємо, що сумарний реактивний опір розсіяння каскаду дорівнює

$$x_{sk} = 2x_{s2}. \quad (40)$$

Тоді еквівалентна схема каскаду буде мати вигляд, представлений на рисунку 136.

2.5.7 Втрати напруги на реактивному опорі розсіювання каскаду

Втрати напруги на реактивному опорі розсіювання каскаду, які дорівнюють

$$U_{xs} = I_p x_{sk}, \quad (41)$$

компенсуються блоком регулювання і стабілізації струму розжарення.

Переріз обмоток трансформаторів Т3, Т4 каскаду вибирається таким чином, щоб його сумарний активний опір був набагато меншим опору $R + R_{\text{каб}}$.

Більш деталізовані розрахунки втрат напруги, з урахуванням активного опору обмоток трансформаторів і особливостей роботи випрямних схем, можуть бути виконані за [10].

2.5.8 Приклад розрахунку

Дано: $I_p = 9,6 \text{ А}$; $R = 0,12 \text{ Ом}$; $l_{\text{каб}} = 10 \text{ м}$.

1. $R_{\text{каб}} = 0,03 \cdot 10 = 0,3 \text{ Ом}$.
2. $U_b = 9,6 \cdot (0,12 + 0,3) = 4,03 \text{ В}$.
3. $U_2 = 0,93 \cdot 4,03 = 3,75 \text{ В}$.
4. Вибираємо $w_2 = 1,3 \cdot 3,75 \approx 5$ витків. Обираємо інші параметри:

$$B = 0,7 \text{ Тл}; \quad k_{\text{ст}} = 0,9; \quad b_{\text{ст}} = 2,5 \text{ см} = 25 \text{ мм}.$$

$$h_{\text{ст}} = \frac{10^6}{4,44 \cdot 400 \cdot 0,7 \cdot 25 \cdot 0,9} = 36 \text{ мм}.$$

5. На рисунках 12, 13а приймаємо:

$$h_{\text{обм}} = 8 \text{ мм}; \quad b = 16 \text{ мм}; \quad d_0 / 2 = 7 \text{ мм} - \text{товщина ізоляції}.$$

Знаходимо $d_0 = 14$ мм; $d = 14 + 16 = 30$ мм; $\beta = \frac{16}{30} = 0,533$,

$$l_{\text{сер}} = 2 \cdot (b_{\text{ст}} + d_0 + h_{\text{обм}}) + 2 \cdot (h_{\text{ст}} + d_0 + h_{\text{обм}}) = \\ = 2 \cdot (25 + 14 + 8) + 2 \cdot (36 + 14 + 8) = 210 \text{ мм.}$$

$$6. \quad x_{s2} = 8 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 210 \cdot 5^2 \left[\ln \frac{30}{16 + 8} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,533} + 1 \right)^2 \ln(1 + 0,533) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,533} - 1 \right)^2 \ln(1 - 0,533) \right] 10^{-10} = 0,009 \text{ Ом.}$$

$$7. \quad x_{sk} = 2 \cdot 0,009 = 0,018 \text{ Ом.}$$

$$8. \quad U_{xs} = 9,6 \cdot 0,018 = 0,17 \text{ В.}$$

3 СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ

В курсовій роботі необхідно виконати розрахунок характеристик енергетичного комплексу електронно-променевої технологічної установки, визначити параметри його схеми та окремих вузлів і високовольтних ізолюючих елементів відповідно до мети і завдань, викладених у розділі 1.

До складу роботи входить:

1. Виконання розрахунків згідно умов завдання за своїм варіантом.
2. Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) з коротким описом завдання, методики розрахунків, з детальними розрахунками, з рисунками (близько 30-40 сторінок).
3. Формулювання підсумку виконання роботи в заключній частині ПЗ.

Окремі структурні частини, які обов'язково мають бути представлені в роботі:

1. Визначення первеансу та ступеню інтенсивності електронного променю.
2. Розрахунок катоду, його струму емісії, режиму розжарювання та інших характеристик згідно умов індивідуального варіанту.

3. Вибір схеми та розрахунок високовольного джерела живлення випрямленої високої напруги на чотирьох каскадах для електронно-променевої гармати на 50...70 кВ. Розрахувати: товщину ізоляції з епоксидного компаунду для трансформаторів; ємнісний фільтр.

4. Розрахунок кіл роздільних трансформаторів з високовольною ізоляцією на 50...70 кВ, включаючи: врахування втрат напруги у високовольному кабелі підведення струму розжарення катоду, розрахунок магнітопроводу, розрахунок реактивного опору каскаду роздільних трансформаторів та втрати напруги на ньому.

5. Підсумок за результатами виконання роботи.

4 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

Основні вхідні дані для розрахунків за варіантами курсової роботи наведено у таблиці 3, інші необхідні параметри і матеріали вибрати відповідно до наведених прикладів.

Таблиця 3. Основні дані для варіантів завдань

Варіант	Струм електронного пучка $I_{\text{п}}$, мА	Довжина катоду $L_{\text{к}}$, см	Прискорювальна напруга U , кВ
1	7	0,8	50
2	8	0,8	60
3	9	0,8	70
4	10	0,8	50
5	11	0,8	60
6	12	0,8	70
7	13	0,8	50
8	7	1,0	60
9	8	1,0	70
10	9	1,0	50
11	10	1,0	60
12	11	1,0	70
13	12	1,0	50
14	13	1,0	60

15	7	1,2	70
----	---	-----	----

Таблиця 3. Продовження

Варіант	Струм електронного пучка $I_{\text{п}}$, мА	Довжина катоду $L_{\text{к}}$, см	Прискорювальна напруга U , кВ
16	8	1,2	50
17	9	1,2	60
18	10	1,2	70
19	11	1,2	50
20	12	1,2	60
21	13	1,2	70
22	7	1,4	50
23	8	1,4	60
24	9	1,4	70
25	10	1,4	50
26	11	1,4	60
27	12	1,4	70
28	13	1,4	50
29	7	1,1	60
30	8	1,1	70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Schwarz H. Remarks on Power Density, Total Power and Pressure of Electron Beams as Welding, Cutting and Surfacing Tool // Rev. Sci. Instr., 1962, 33, № 6, p. 688.
2. Чвертко А.И., Назаренко О.К. и др. Оборудование для электронно-лучевой сварки. - К.: Наукова думка, 1973. - 408 с.
3. Зинченко Н.С. Курс лекций по электронной оптике. - Харьков: ХГУ, 1958.-275с.
4. Мик Дж., Крэгс Дж.. Электрический пробой в газах. - М.: Иностранная литература, 1960. -392с.
5. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: навчальний посібник / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, О. П. Проценко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 218 с. – Бібліогр.: с. 209 – 211. – 300 пр.
6. Тараненко В.П. Электронные пушки. - Киев: Техника, 1964. - 180 с.
7. Кацман Ю.А. Электронные лампы для высоких и низких частот. -М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. -312 с.
8. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства металлов. Справочник. Изд. 3-е, дополн. - К.: Наукова думка, 1970. -148 с.
9. Гинзбург Л.Д. Высоковольтные трансформаторы и дроссели с эпоксидной изоляцией. - Л.: Энергия, 1978. - 192 с.
10. Векслер Г.С. Расчет электропитающих устройств. - К.: Техника, 1978. - 208с.
11. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 488 с.